

III.1. Introduction

L'influence des ajouts sur le comportement d'un sol et le traitement des sols est souvent utilisée pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme.

III.2. Influence des ajouts sur le comportement d'un sol

III.2.1. Effet de fibre de polypropylène

III.2.1.1. Influence de la fibre sur les caractéristiques de cisaillement

L'utilisation de l'inclusion de fibres de polypropylène pour l'amélioration des propriétés mécaniques des sols faibles est une méthode qui a récemment attiré l'attention répandue dans le domaine de l'ingénierie géotechnique. Le comportement de la fibre renforcée des sols a été un sujet commun de recherche pour les 20 dernières années. Les sols sableux plus précisément, de nombreux chercheurs ont concentré leurs recherches sur le comportement mécanique de la fibre renforcée (Gray et Ohashi 1983 Shewbridge et Sitar 1990, Maher et Gray 1990, Bauer and Oancea 1996, Murray et al. 2000, Consoli et al. 2002).

En contradiction, la recherche menée par Tang et al. (2007), Ahmad et al. (2010) et Pradhan et al. (2012) ont démontré que le pourcentage de fibres joue un rôle important dans l'augmentation de la résistance au cisaillement deux paramètres ϕ et c . Par conséquent, plus de travail est nécessaire pour mettre en évidence l'influence des fibres sur la résistance au cisaillement des sols et en particulier sur l'efficacité de l'addition de fibres sur les différents paramètres (Angle de frottement, la cohésion, la réponse volumétrique) du comportement en cisaillement des sols cohésifs.

Pradip Kumar Pradhan et al. (2011) en réalisant des essais non drainées et non consolidées de cisaillement direct de L'échantillon de sol ont été recueillis localement à partir de près de Sambalpur ville de l'Inde. Les échantillons ont été préparés à 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 et 0.5%. A partir de figure III.1, on observe que le pic et la puissance résiduelle du sol renforcé par des fibres se produisent à un déplacement horizontal par rapport au sol non renforcé.

L'observation de ces chiffres indique que, avec augmentation de la contrainte normale à la fois de pointe et la résistance résiduelle de l'augmentation de sol renforcé. En outre, ces résistances augmentent avec l'augmentation de la teneur en fibres allant jusqu'à 0.4%, au-delà de qui ils diminuent. Ainsi, la teneur en fibres optimal se révèle être de 0.4%. Avec l'inclusion de

polypropylène des fibres dans le sol, l'augmentation maximale de l'intensité pic est observée à basse tension normale (100 kPa), alors que l'augmentation maximale de la résistance résiduelle est observée à forte contrainte normale (300 kPa). Avec l'inclusion de fibres, le pic et les contraintes de cisaillement résiduelles sont augmentés par des facteurs 2.7 et 2.3.

Les paramètres observés de cisaillement (C et ϕ) présentés dans le tableau III.1., indiquent que le sol renforcé présente une augmentation de l'angle de frottement interne (ϕ) et de la cohésion (C) avec augmentation de la teneur en fibres correspondant à la fois de crête et la résistance résiduelle, jusqu'à la dose optimale et diminue ou presque reste la même, Cet effet peut être dû à une interaction entre le sol et la fibre.

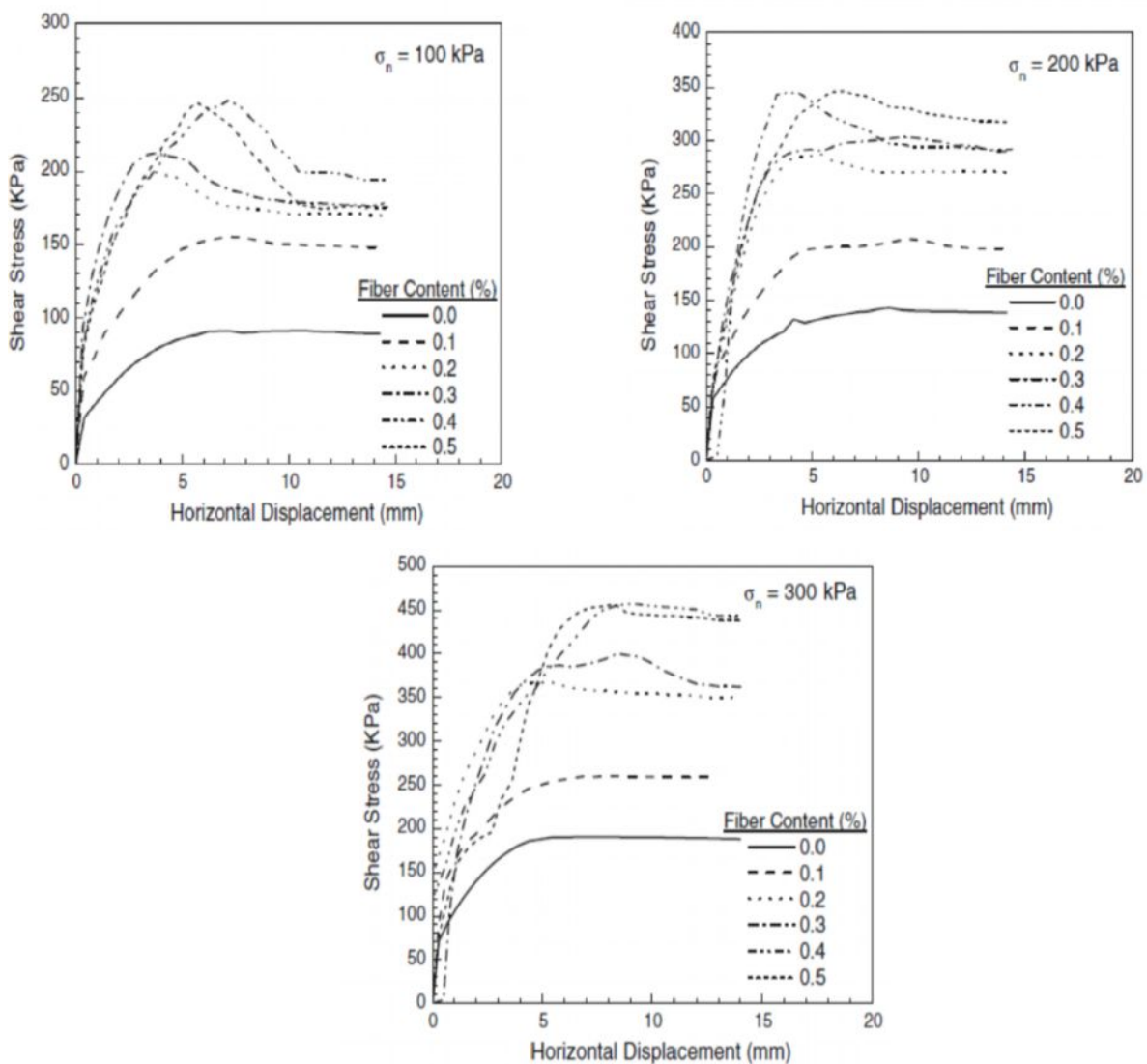


Figure III.1: Courbes contrainte-déplacement pour un sol renforcé par des fibres à partir des essais de cisaillement direct ($l/d = 100$) (Pradip Kumar Pradhan et al. 2011).

Consoli et al. (2003) ont réalisé des essais triaxiaux sur sol cohérent et ont montré que les fibres ont augmenté sensiblement la cohésion (C), tandis que l'angle de frottement (ϕ) était à peine affecté par l'inclusion de fibres de polypropylène. Des résultats similaires ont été obtenus à partir des essais de cisaillement direct réalisé par Zaimoglu et Yetimoglu (2011).

Tableau III.1: Paramètres de cisaillement renforcé de fibres obtenues à partir du sol essai de cisaillement direct ($l/d = 100$) (Pradip Kumar Pradhan et al. 2011).

Sl. no.	Fiber content (%)	Cohesion (c), kPa		Angle of internal friction (ϕ), degrees	
		Peak	Residual	Peak	Residual
1	0.0	45	40	26	26
2	0.1	90	90	30.3	30.1
3	0.2	130	90	38	40.9
4	0.3	130	95	41	44.1
5	0.4	145	96	45.85	44.4
6	0.5	165	50	42	52

Costas A. et al. (2013). Ont réalisé Une série de tests de cisaillement directs consolidés non drainés ont été menées sur limon sableux, ils ont trouvé que la résistance au cisaillement des sols augmente avec l'inclusion de fibres jusqu'à la dose optimale (Figure III.2).

Tableau III.2: Paramètres de résistance au cisaillement de pointe et de résistance au cisaillement des échantillons de sable de limon renforcée et non renforcés basées sur des tests CU (Costas et al. 2013).

Fibre content (%)	Normal stress (kPa)	Peak shear strength (kPa)	Peak shear strength improvement (%)	ϕ (degrees)	c (kPa)
0	50	43.3		35.8	2.5
	100	76.4			
	200	150.8			
0.3	50	57.8	33.3	41	10
	100	101.4	32.8		
	200	188.3	24.9		
0.5	50	76.4	76.3	44.6	15.6
	100	109.4	43.3		
	200	221.1	46.6		
0.7	50	68.1	57	44.6	19.6
	100	132.2	73		
	200	219.2	45.3		

Le tableau (3.2) montre que l'inclusion de fibres améliore la contrainte de cisaillement maximale de sol donne lieu à des valeurs plus élevées de ϕ et C , qui augmentent avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à 0.5%, Au-delà de la dose optimale, les paramètres de cisaillement observés diminuent ou restent à peu près les mêmes.

En effet, une teneur élevée en fibres conduit à un mauvais mélange avec moins de contact entre les particules du sol, ce qui réduit la disponibilité de la matrice du sol pour maintenir la fibre et le développement d'une liaison suffisante entre les fibres et le sol (figure 3.2).

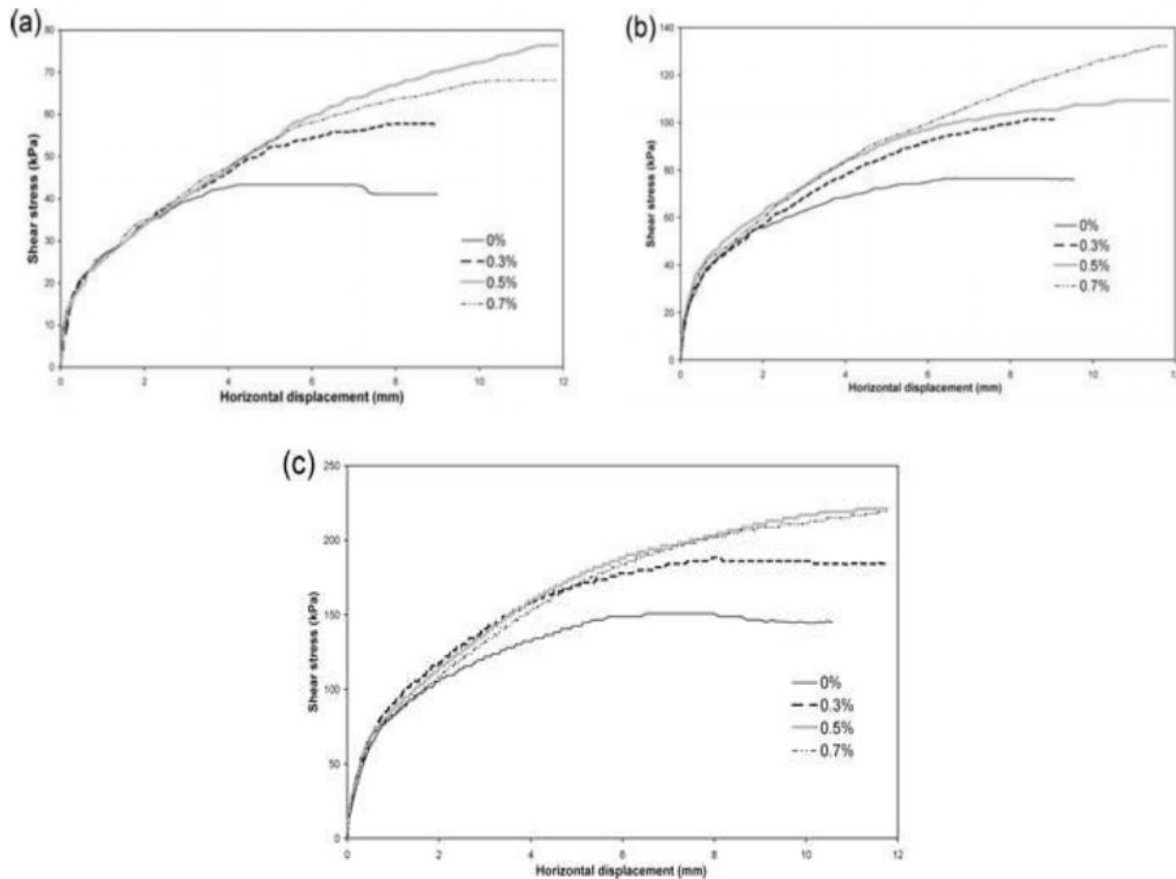


Figure III.2: Variation de la contrainte de cisaillement avec déplacement horizontal pour limon sableux renforcé et non renforcé obtenu à partir de tests de CU à une contrainte normale de:
a. 50kPa, b. 100kPa, c. 200 kPa (Costas et al. 2013).

3.2.1.2. Influence de la fibre sur l'indice CBR

De nombreuses études ont été effectuées dans le but de voir l'effet de fibre de polypropylène sur le CBR des sols instables à traiter. Nagrale et al. (2005) ont étudié l'amélioration de la valeur CBR du sol de fondation avec l'inclusion de fibres de polypropylène et ont conclu que 1.5% de fibres avec un rapport d'aspect 100 et 84 serait respectivement la quantité optimale dans le sol argileux et de sable fin.

Rabindra Kumar Kar et al. (2014) en réalisant des essais de CBR sur des échantillon de sol recueillis localement près de Sambalpur ville de l'Inde pour examiner les effets des fibres de polypropylène sur la résistance ultime du sol renforcé par des fibres. Les éprouvettes d'essai CBR

ont été préparées dans un moule cylindrique de 150mm de diamètre et 175mm de hauteur par le compactage du mélange sol-fibre à densité maximale de la norme Proctor. Trois spécimens ont été préparés pour chaque testa différents pourcentage de fibre 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 et 1.6% pour un rapport d'aspect $l/d = 75, 100$ et 125 . Les résultats des tests de CBR sont présentés sur la figure (3.3). Les résultats montrent que l'inclusion de fibres, les valeurs de CBR imbibés augmentent jusqu'à la teneur en fibres de 1.4% pour tous les trois rapports d'aspect étudiés. Les valeurs de CBR sont augmentées par des facteurs 2.3, 2.8 et 2.7 pour des longueurs de fibre 15, 20 et 25mm, respectivement, par rapport à celle du sol non renforcé. On observe également que les valeurs du CBR augmentent avec l'augmentation de la longueur de fibre jusqu'à 20mm, puis diminuent. La diminution de la valeur du CBR à la teneur en fibres au-delà de 1.4% et une longueur de fibre au-delà de 20mm peut être dû au fait que, avec une teneur plus élevée en fibres, la quantité de matrice de sol disponible pour la tenue de la fibre est insuffisante pour développer une liaison efficace entre les fibres et le sol, provoquant le détachement des fibres et un mauvais mélange. Ainsi, la dose optimale de la fibre est de 1.4% pour la longueur de fibre de 20mm ($l/d = 100$).

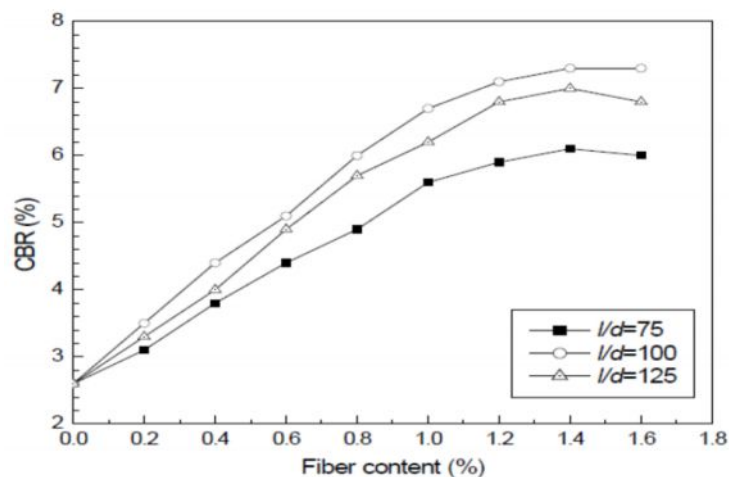


Figure III.3: Valeurs de CBR pour sol renforcées à différentes teneurs en fibres (Rabindra Kumar Kar et al. 2014).

3.2.1.3. Influence de la fibre sur la résistance à la compression

Sahin Zaimoglu et al. (2011) ont réalisé des essais de compression non confinés sur un sol à grain fin naturel déposé dans la province d'Erzurum en Turquie. Les pourcentages de fibres de polypropylène choisis: 0.25, 0.5, 0.75 et 1%.

La figure (3.4) montre la variation de la résistance à la compression sans confinement (UCS) avec une teneur en fibres de polypropylène. La résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. Cependant, le taux d'augmentation de la résistance à la compression sans confinement n'est pas significative pour une teneur en fibres supérieure à 0.75%

Par rapport à l'échantillon non renforcé, la valeur UCS de l'échantillon renforcée à 0.75% de fibres de polypropylène a augmenté d'environ 85% (à savoir, 392-727 kN/m²).

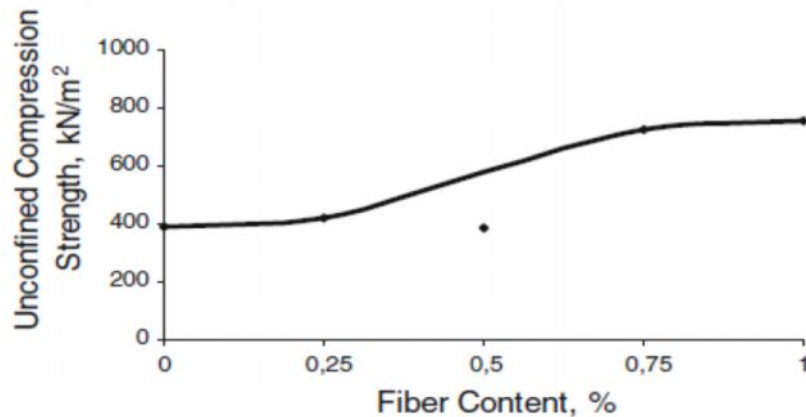


Figure III.4: Effet de la teneur en fibres sur la résistance à la compression non confinée (Zaimoglu et al. 2011).

Sahin Zaimoglu (2015) a réalisé une série d'essais de compression non confinés (7, 14 et 28 jours) effectués sur chaque échantillon. 0-20%, Boral Gypsum, 0-20% cendre volante, 0 à 0.25% de polypropylène et de 0 à 3% de ciment. Le sol utilisé dans cette étude a été obtenu à partir d'un dépôt de sol à grains fins de Konakl -Erzurum dans la région de l'Anatolie orientale de la Turquie. Les effets des paramètres sur la résistance à la compression non confinée à 7, 14 et 28 jours sont donnés dans les figures (3.5, 3.6 et 3.7). Les figures (3.5) et (3.6) montrent que le paramètre le plus efficace sur la résistance à la compression non confinée à 7 et 14 jours est PP. On voit que la résistance à la compression non confinée à 7 et 14 jours a augmenté avec l'augmentation du rapport de PP. La figure (3.7) montre que, 1.5% Ratio des PP augmente la résistance à la compression non confinée (28 jours), mais 2,5% Ratio des PP diminue la résistance à la compression non confinée à 28 jours.

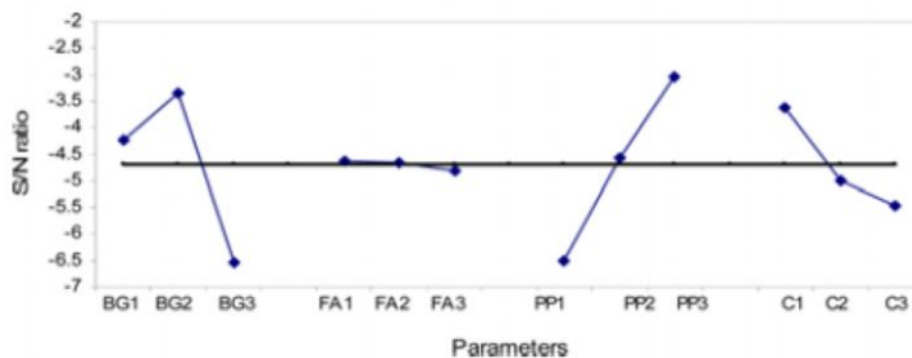


Figure III.5: Courbe des réponses des effets principaux de résistance en compression non confinée

confinée (7 Jours) (Zaimoglu, 2015).

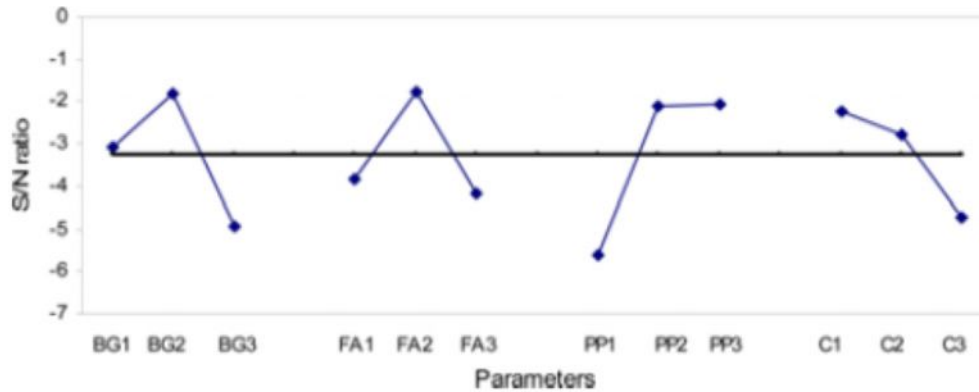


Figure III.6: Courbe des réponses des effets principaux de résistance en compression non confinée (14 jours) (Zaimoglu, 2015).

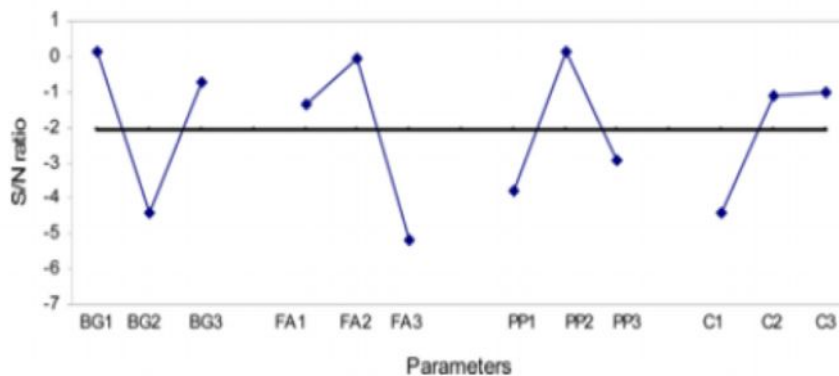


Figure III.7: Courbe des réponses des effets principaux de résistance en compression non confinée (28 jours) (Zaimoglu, 2015).

3.2.2. Effet du ciment

3.2.2.1. Influence du ciment sur les limites d'Atterberg

Le ciment est généralement utilisé pour les sols de faible plasticité. Tous les auteurs s'accordent que l'addition du ciment cause une réduction dans l'indice de plasticité. Ces résultats ont été confirmés par de nombreux chercheurs (Okagbue et al. 2000; Parsons et al.2005). Ghembaza et al. (2012) ont amélioré de manière significative, les propriétés physiques d'un sable limoneux très fin par ajout de ciment et le soumettre à un essai Proctor normal. Ils ont observé une diminution de la limite de liquidité qui passe 33% à 29.34% et une augmentation de la limite de plasticité qui passe de 21 % à 23.93% avec l'accroissement de la quantité de ciment (figure 3.8). La variation de l'indice de plasticité en fonction du pourcentage de ciment est représentée dans la figure (3.9). On constate une diminution de l'indice de plasticité (I_p) lorsque la teneur en ciment augmente.

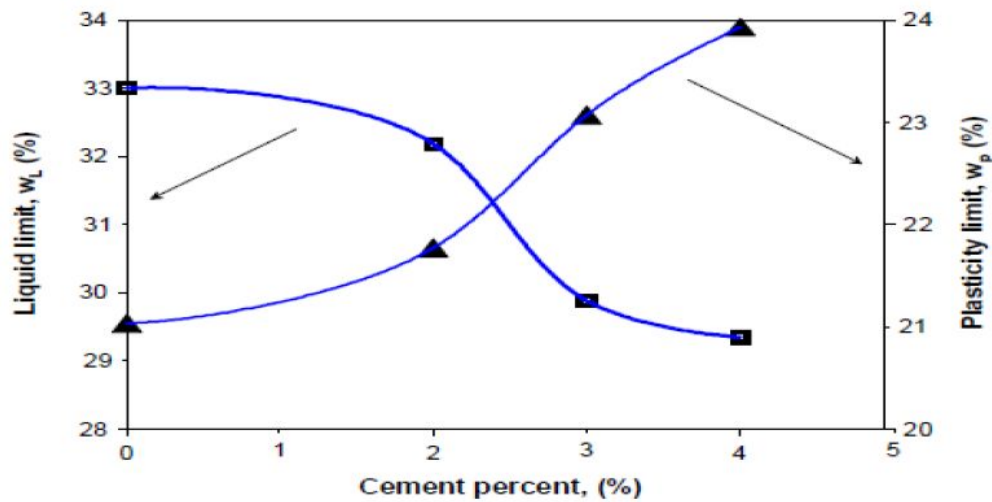


Figure III.8: Variation de la limite de liquidité et de plasticité en fonction du pourcentage de ciment (Ghembaza et al. 2012).

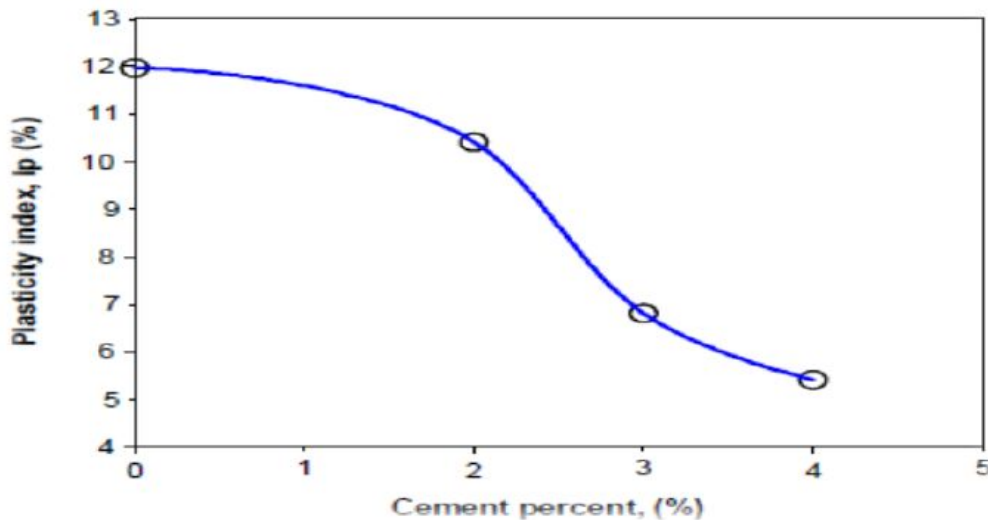


Figure III.9: Variation de l'indice de plasticité en fonction du pourcentage de ciment (Ghembaza et al. 2012).

3.2.2.2. Influence du ciment sur les caractéristiques de cisaillement

Gay et Schad (2000) ont montré que les caractéristiques de cisaillement d'un sol instable traité avec différentes teneurs en ciment ont été améliorées d'une façon remarquable et ceci pour différentes périodes de cure (Figure 3.10).

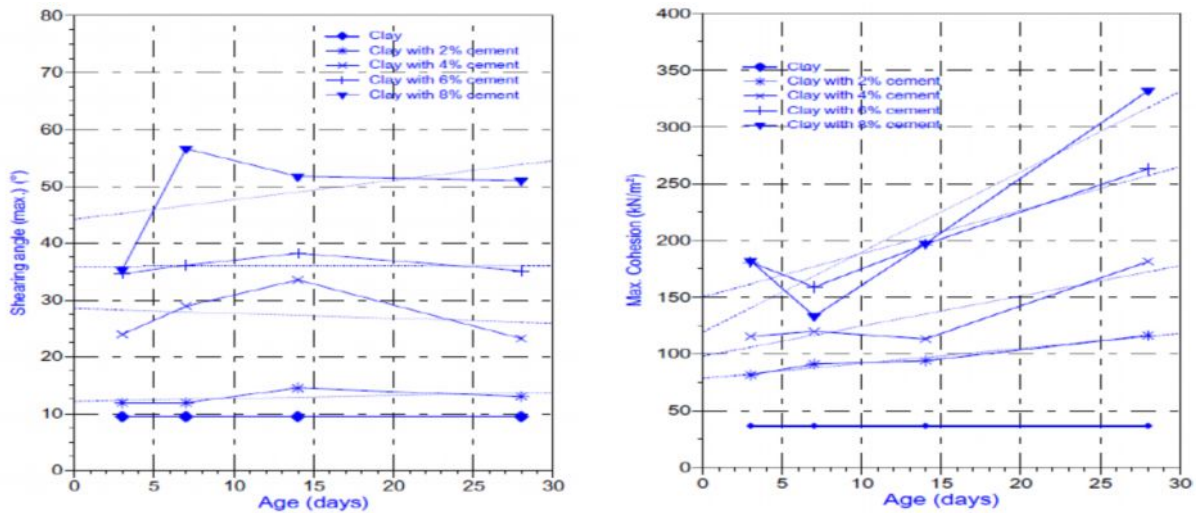


Figure III.10: Effet du ciment sur les caractéristiques de cisaillement (Gay et Schad, 2000).

a. Variation de l'angle de frottement interne, b. Variation de cohésion

Ainsi pour une teneur en ciment de 8% et une période de cure de 28 jours, l'angle de frottement interne est environ 5 fois celui du sol instable non traité. Ceci traduit bien la stabilité requise après l'amélioration par le ciment du sol instable. Le même comportement est observé pour la cohésion qui représente 7.5 fois celle du sol non traité. La figure (3.11) montre qu'il y a une augmentation notable de la cohésion non drainée pour différents dosages en ciment et différentes périodes de cure (Saeed Sasanian 2011).

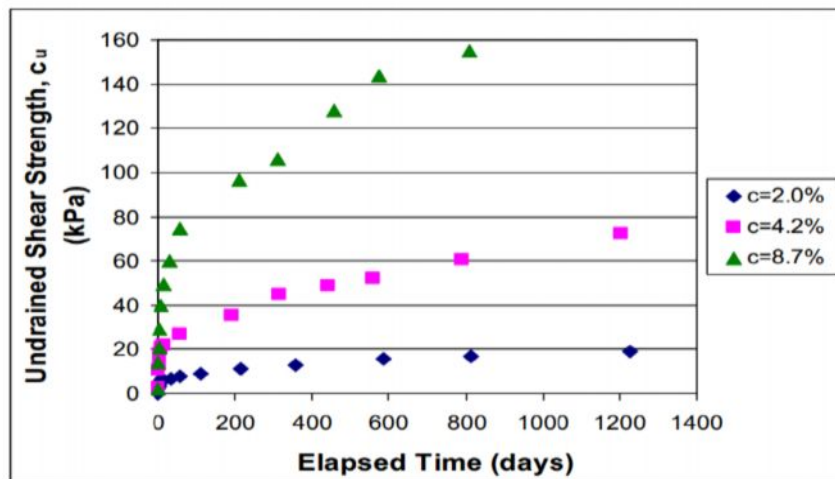


Figure III.11: Variation de la cohésion non drainée eu fonction de la période de cure (Saeed Sasanian 2011).

Chao sheng Tang et al. (2006) ont réalisé Une série d'essais de cisaillement direct sur des échantillons de sols avec différents pourcentages de fibres et de ciment. Les échantillons de sol utilisés dans les essais expérimentaux ont été obtenus à partir de la zone de Nanjing (Chine). La

figure (3.12) montre la relation entre les paramètres de résistance au cisaillement et la teneur en fibres. Il est indiqué que le pourcentage de fibres et de ciment jouent un rôle important dans le développement de la résistance au cisaillement (les paramètres C et ϕ). La cohésion et angle de frottement augmentent avec l'augmentation de pourcentage de fibres. Si la teneur en fibres reste le même, l'inclusion de ciment augmente de manière significative les paramètres de résistance au cisaillement.

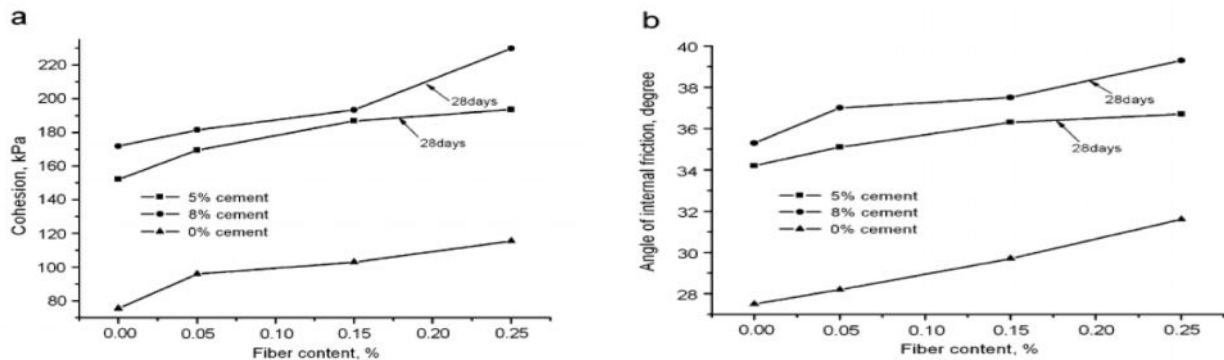


Figure III.12: Relation entre les paramètres de résistance au cisaillement et la teneur en fibres: a. Cohésion et teneur en fibres, b. Angle de frottement interne et teneur en fibres (Chao sheng Tang et al., 2006).

3.2.2.3. Influence du ciment sur la résistance à la compression

Kenai et al. (2006) ont étudié la résistance à la compression à l'état sec et la résistance à la compression après immersion dans l'eau pendant 48 heures à 28 jours. Les essais ont été faits sur une argile sableuse avec l'addition de 0, 4, 6, 8, 10, 12, 15 et 20% du ciment portland de type CEMI 32.5. Les résultats sont montrés dans le tableau suivant:

Tableau III.3: Effet du ciment sur la résistance à la compression à l'état sec et après immersion (Kenai et al. 2006).

Contenu du Ciment %	0	4	6	8	10	12	15	20
Résistance à la compression à l'état sec (MPa)	1.67	2.34	3.28	4.02	4.20	5.19	6.14	6.5
Résistance à la compression résiduelle relative (%)	0	52.06	54.79	50.54	50.52	40.58	39.55	40.92

Les résultats obtenus (Tableau 3.3) montrent que l'augmentation du dosage du ciment augmente de la résistance à la compression. Ceci est dû à l'hydratation suffisante du ciment dans les pores de la

matrice et la rigidité élevée de sa structure par la formation d'un grand nombre de liant rigide dans le sol. Ces liants qui lient les particules d'argile ont pu attribuer des produits de cimentation tels que les hydrates de calcium silicate (CSH), hydrates calcium aluminate (CAH) et hydrates calcium alumino-silicate (CASH). L'immersion dans l'eau pendant 48h réduit la résistance à la compression jusqu'à 60% et la désintégration complète des spécimens non stabilisés était observée en quelques minutes.

Nour-Said Ikhlef et al. (2015) ont étudié l'effet de ciment sur la résistance à la compression de limon de Telagh (Sidi Bel Abbès). Les résultats obtenus (figure 3.13) montrent que l'augmentation du dosage du ciment augmente la résistance à la compression. À partir d'un dosage de 4% du ciment, les échantillons stockés jusqu'à 180 jours ont une résistance en compression simple d'environ 4.5 MPa, soit environ dix fois supérieure à celle du matériau non traité. Cette valeur de résistance augmente de façon significative lorsque le pourcentage de ciment est compris entre 4 et 6% des échantillons stockés jusqu'à 180 jours.

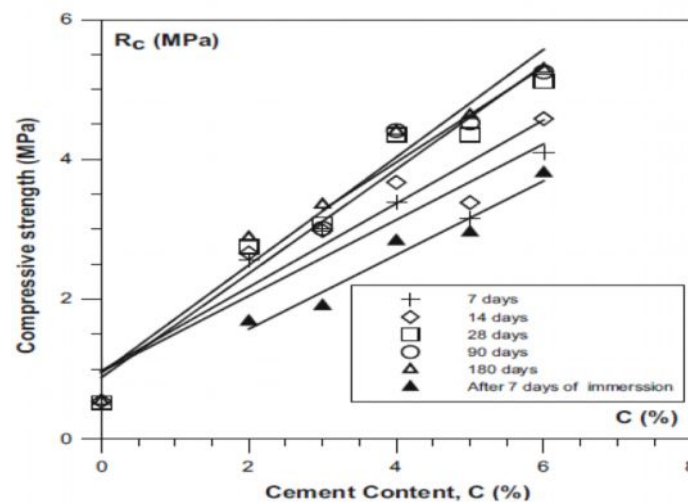


Figure III.13: Evolution de la résistance à la compression en fonction du dosage de ciment pour les différents période de cure (Nour-Said Ikhlef et al. 2015).

3.2.3. Effet de la chaux

3.2.3.1. Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg

Hachichi A. et al. (2011) ont réalisé des essais sur l'argile de Mers El Kébir (Nord-Ouest de l'Algérie) pour apprécier l'influence de l'ajout de la chaux à différents pourcentages sur les limites d'Atterberg. Le tableau (3.4) montre que La limite de liquidité (W_L) diminue et la limite de plasticité (W_P) augmente avec les pourcentages jusqu'à la stabilisation dans la zone comprise entre 6% à 8%. L'indice de plasticité (I_P) subit une diminution relativement importante avec le traitement. L'addition d'un pourcentage supplémentaire (plus de 8%) de chaux a un faible effet sur les limites,

c'est à dire que W_L diminue très faiblement pendant que W_P se stabilise ou diminue légèrement. L'addition d'un pourcentage supplémentaire (plus de 8%) de chaux a un faible effet sur les limites, c'est à dire que W_L diminue très faiblement pendant que W_P se stabilise ou diminue légèrement.

Tableau III.4: Limites de consistances mesurées en présence de la chaux.

(Hachichi et al 2011).

Matériaux	Limites d'Atterberg	H ₂ O	CHAUX			
			2%	4%	6%	8%
Mers El Kébir	w_L	49.0	47	43	42	42
	w_P	21.0	21	23	28	28
	I_P	30	25	20	15	13

Z. Nalbantoglu (2006) et F. G. Bell (1989 et 1996) ont montré que la limite de liquidité diminue après le traitement des sols par la chaux, pour la Kaolinite, elle reste inchangée et augmente parfois.

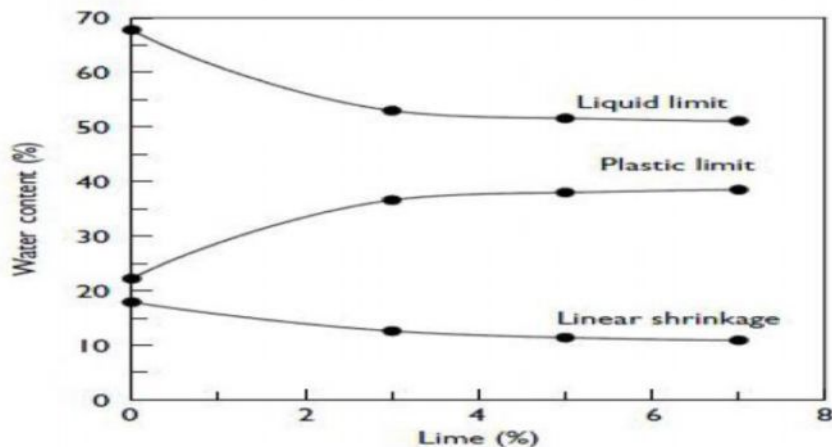


Figure III.14: Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (Z. Nalbantoglu, 2006).

3.2.2.2. Influence de la chaux sur les caractéristiques de cisaillement

De nombreuses études ont été effectuées dans le but de voir l'effet de l'addition de la chaux sur la résistance au cisaillement des sols instables à traiter. Plusieurs chercheurs (Osula 1991, Gay et Schad 2000, Muntoharet Hantoro 2000, Bagherpour et Choobbasti 2003, Lin et al. 2007) ont montré que la stabilisation des sols instables à l'aide de la chaux provoque une augmentation de la résistance au cisaillement de ces sols traités par rapport aux sols naturels. Les résultats obtenus par Muntohar et Hantoro (2000) montrent que pour un dosage en chaux de 10 % l'angle de frottement

est environ 1.7 fois supérieur à celui du sol non traité. De même la cohésion est 1.3 fois supérieure à celle du sol non traité.

Harichane et al. (2011) ont étudié l'effet de la chaux sur la contrainte de cisaillement maximale de sol gris pour différentes périodes de cure .L'augmentation de la durée de cure a augmenté la contrainte de cisaillement de sol testé. L'ajout de chaux a un important effet sur la contrainte de cisaillement en particulier au-delà de 28 jours et les échantillons contenant 8% de chaux pour le sol gris et amélioré (figure 3.15).

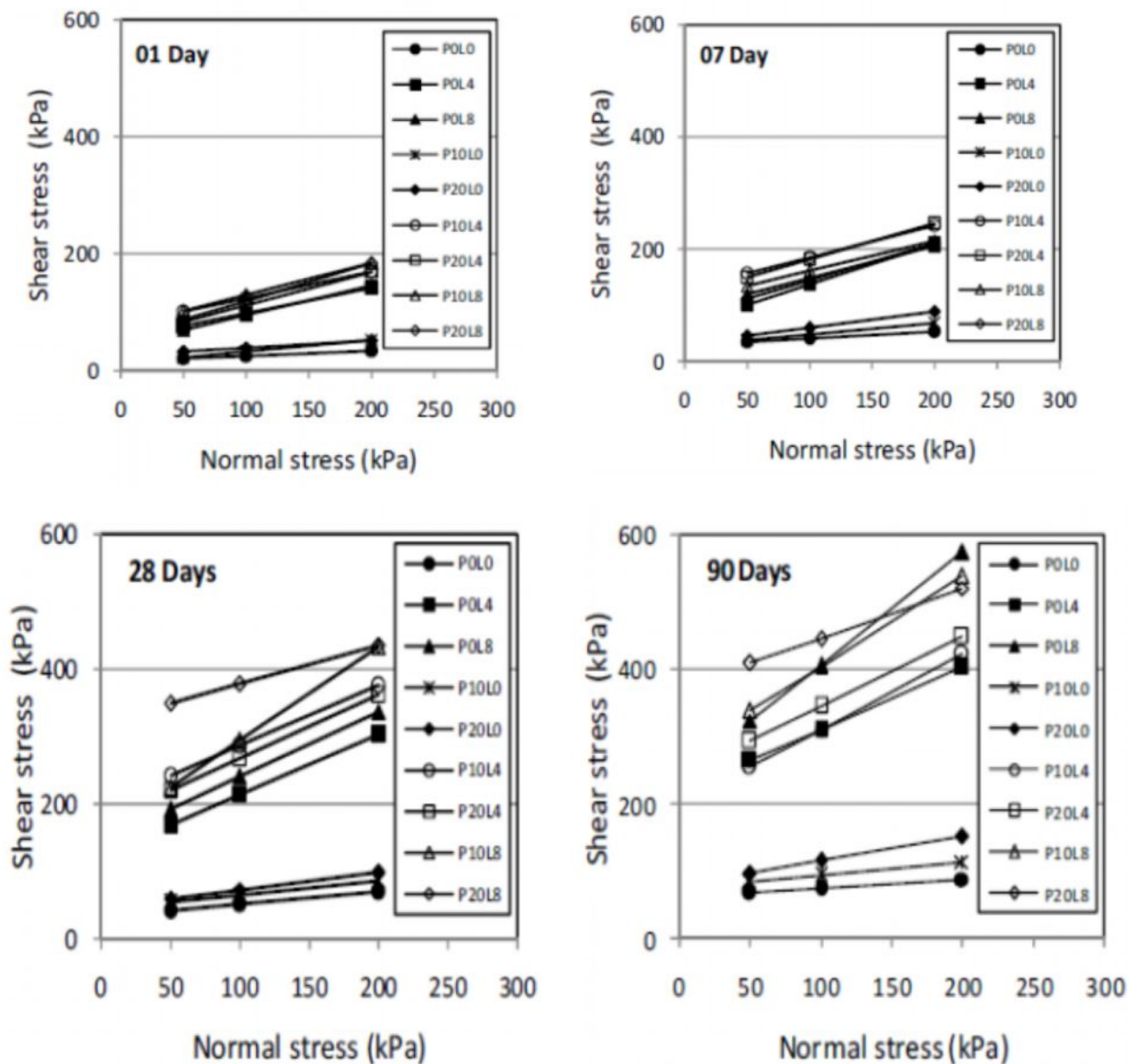


Figure III.15: Variation de la contrainte de cisaillement avec la contrainte normale du sol gris pour différentes périodes de cure (Harichane et al. 2011).

La variation des paramètres de cisaillement de sols traités est représentée sur la figure (3.16).

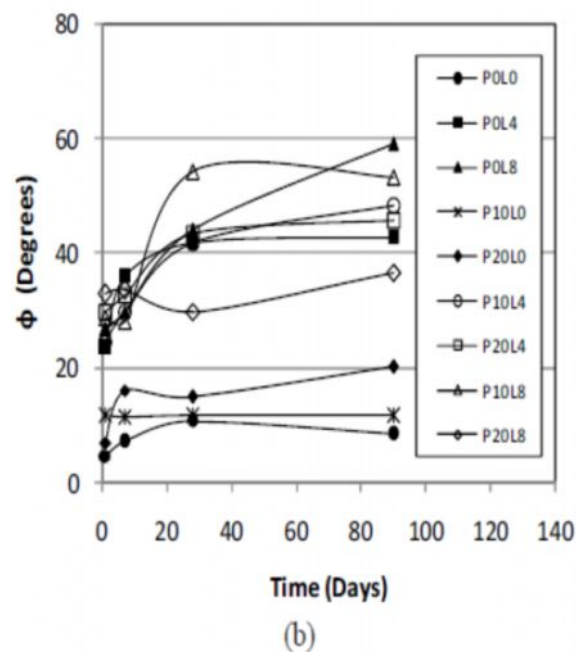
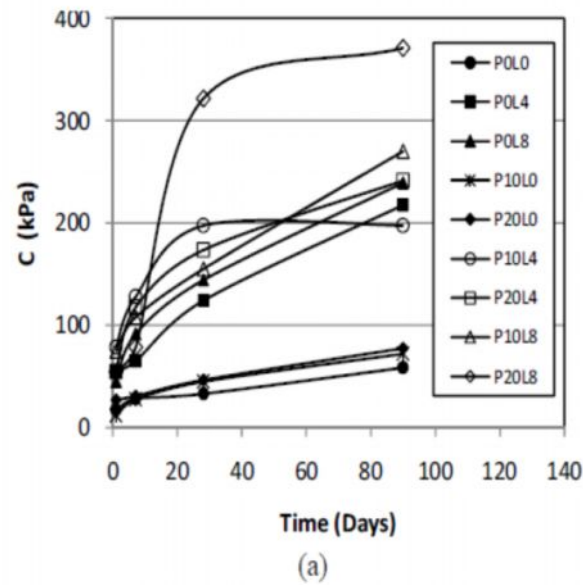


Figure III.16: Variation des paramètres de cisailment du sol gris avec la durée de cure
a. Cohésion; b. Angle de frottement (Harichane et al. 2011).

3.2.3.3. Influence de la chaux sur la résistance à la compression

Mellal et Lamri. (2010) ont étudié l'influence de la chaux sur la résistance à la compression pour différentes périodes de cure. La figure (3.17), représente le développement de la résistance à la compression en fonction des différentes conditions de cure pour les mélanges traités et non traités. On remarque que pour une durée de cure nulle (l'écrasement immédiat), la résistance à la compression garde sa valeur faible pour les différents mélanges. Pour la durée de cure de 28 jours, on constate une évolution importante avec l'augmentation du pourcentage de la chaux, les valeurs de la résistance obtenues pour les mélanges $C = 1, 2, 3$ et 4% sont respectivement 2.08, 2.7, 3.1 et

3.7 MPa. Pour la durée de cure de 90 jours, on remarque une faible augmentation de la résistance qui varie de 3.7 à 3.93 MPa pour un pourcentage de 4%. La résistance à la compression augmente avec l'accroissement du pourcentage en chaux dans les mélanges traités, cette augmentation peut être expliquée par l'addition des matériaux fins dans les sols qui implique une augmentation de la cohésion. La raison de la forte augmentation de la résistance à la compression après 28 jours est justifiée par la réaction d'hydratation de la chaux pendant cette période.

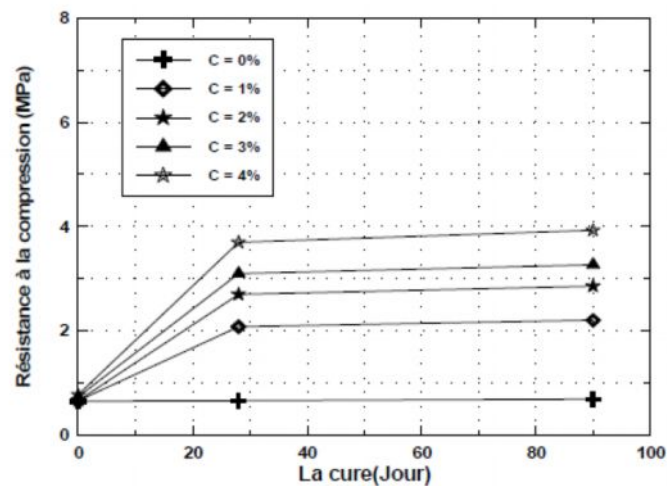


Figure III.17: Variation de la résistance à la compression en fonction de la durée de cure et le pourcentage en chaux additionné (Mellal et Lamri, 2010).

Manasseh et Olufmi (2008) ont obtenu une valeur optimale de la chaux de 8%, pour laquelle la résistance à la compression augmente de 126 kN/m², à 1400 kN/m² et 1480 kN/m² à 7, 14 et 28 jours respectivement.

3.2.4. Effet des cendres volantes

3.2.4.1. Influence des cendres volantes sur les limites d'Atterberg

L'addition des cendres volantes, en général, diminue l'indice de plasticité. Elles réduisent l'indice de plasticité des sols de plasticité élevée. Tandis que, elles ont peu d'influence sur l'indice de plasticité des sols de faible plasticité (Dégirmenci et al. 2007; Bin-Shafique et al. 2009).

Selon Vukićević .M (2013), les cendres volantes modifient le comportement de plasticité des sols instables. Cet auteur a utilisé deux types de sol avec les cendres volantes de la centrale thermique "Kolubara" (KFA): Soil A: avec haut plasticité, Soil B: avec faible plasticité. Dans le cas du milieu de terrain de grande plasticité (sol A), on constate que l'augmentation du KFA diminue la limite de liquidité et l'indice de plasticité, ce qui n'est pas le cas de sol de faible plasticité (sol B), comme le montre la figure (3.18).

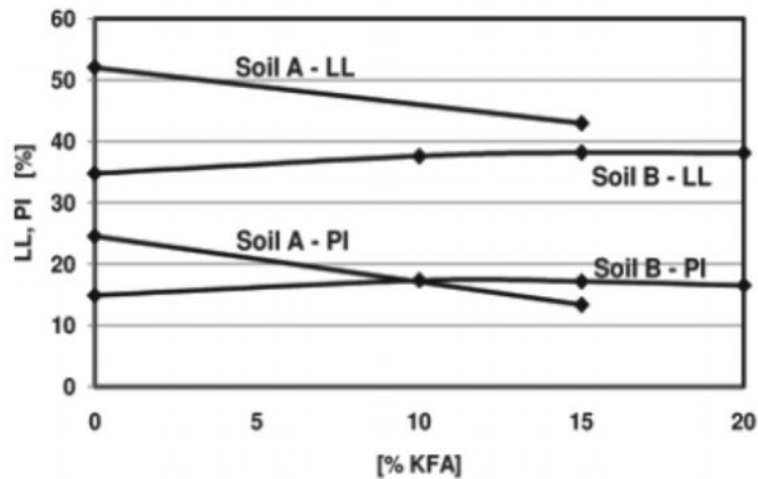


Figure III.18: Variation des limites d'Atterberg pour les mélanges à t = 0
(Vukićević, 2013).

3.2.4.2. Influence des cendres volantes sur l'indice CBR

De nombreuses études ont été effectuées dans le but de voir l'effet de l'addition de cendre volante sur le CBR des sols instables. Plusieurs chercheurs (Mackiewicz et Ferguson 2005, White et al. 2005 et Edil et al. 2006) ont montré que la stabilisation des sols instables à l'aide de la cendre volante provoque une augmentation du CBR.

Gümüşer et A. Şenol. (2013) ont réalisé des essais sur des échantillons de sol préparés à trois pourcentages différents de la teneur en fibres (0.5, 1 et 1.5% en poids du sol) et deux pourcentages différents de cendres volantes (à savoir 10% et 15% en poids du sol). Le tableau (3.5) indique que:

a- L'addition de fibres de polypropylène à la cendre volante- mélanges de sol a entraîné une augmentation significative des valeurs de CBR.

b- Les échantillons de sol argileux stabilisés avec des fibres de cendres volantes et de polypropylène montrent une augmentation des valeurs de CBR; pour le sol + 15% des cendres volantes + 0,5% MF cela était d'autant que 63.79% en raison de la cendre volante agissant comme un agent de liaison.

c- La valeur maximale de CBR des groupes SOFA 15MF0.5, SOFA 15FB0.5 était de 29%, tandis que la valeur minimale de 1.97% a été obtenue pour le groupe SOFA MF1.5.

d- Le CBR des fibres multi filamentaires (moyenne de F19) était un peu plus élevé que pour les fibres de polypropylène (F19 de moyenne).

Tous les résultats ont indiqué qu'une augmentation des cendres volantes a entraîné une augmentation des valeurs de CBR, qui a été améliorée par l'addition de fibres de polypropylène.

Tableau III.5: Détail de cendre volante-sol-mélanges de fibre pour les essais réalisés (Gümüşer et Şenol, 2013).

Combinaison	Soil (%)	Fly Ash (%)	Fiber (%)	MDUW (kg/m ³)	OWC (%)	CBR average	CBR rate of increase	
SO	SOIL	100	0	0	1320.00	35.80	0.47	1
SOF A10	SOIL+ FLY ASH 10 %	90	10	0	1281.35	38.63	6.16	13.11
SOF A15	SOIL+ FLY ASH 15 %	85	15	0	1238.05	40.85	13.47	28.65
SOF AFB1.5	SOIL+ FLY ASH 0 % + FB 1.5 %	98,5	0	1,5	1265,97	34,45	2,7657	5,88
SOF AFB1	SOIL+ FLY ASH 0 % + FB 1 %	99	0	1	1288,1	35,3	3,2372	6,89
SOF AFB0.5	SOIL+ FLY ASH 0 % + FB 0.5 %	99,5	0	0,5	1287,7	34,88	3,2947	7,01
SOF AMF1.5	SOIL+ FLY ASH 0 % + MF 1.5 %	98,5	0	1,5	1271,4	34,8	1,978	4,21
SOF AMF1	SOIL+ FLY ASH 0 % + MF 1 %	99	0	1	1292,5	36,31	2,3172	4,93
SOF AMF0.5	SOIL+ FLY ASH 0 % + MF 0.5 %	99,5	0	0,5	1286,29	35,79	2,2195	4,72
SOF A10FB1.5	SOIL+ FLY ASH 10 % +FB 1.5 %	88,5	10	1,5	1248	37,55	15,116	32,16
SOF A10FB1	SOIL+ FLY ASH 10 % +FB 1 %	89	10	1	1268,81	38,09	18,078	38,46
SOF A10FB0.5	SOIL+ FLY ASH 10 % +FB 0.5	89,5	10	0,5	1283,14	37,91	22,298	47,44
SOF A10MF1.5	SOIL+ FLY ASH 10% +MF 1.5 %	88,5	10	1,5	1245,12	37,11	18,434	39,22
SOF A10MF1	SOIL+ FLY ASH 10 % +MF 1 %	89	10	1	1262,63	37,67	21,717	46,21
SOF A10MF0.5	SOIL+ FLY ASH 10 % +MF 0.5	89,5	10	0,5	1272,42	37,83	23,925	50,91
SOF A15FB1.5	SOIL+ FLY ASH 15% +FB 1.5 %	83,5	15	1,5	1243,29	37,62	27,651	58,83
SOF A15FB1	SOIL+ FLY ASH 15% +FB 1 %	84	15	1	1245,65	38,91	27,513	58,54
SOF A15FB0.5	SOIL+ FLY ASH 15% +FB 0.5 %	84,5	15	0,5	1251,4	39,24	29,307	62,36
SOF A15MF1.5	SOIL+ FLY ASH 15% +MF 1.5 %	83,5	15	1,5	1229,47	38,67	23,327	49,63
SOF A15MF1	SOIL+ FLY ASH 15% +MF 1 %	84	15	1	1248,15	39,36	27,933	59,43
SOF A15MF0.5	SOIL+ FLY ASH 15% +MF 0.5 %	84,5	15	0,5	1256,05	39,21	29,980	63,79

$CBR_{\text{rate of increase}} = CBR_{\text{average}} / CBR_{\text{unreinforced}}$

FB: Fibrillated polypropylene fiber, MF: Multiflament polypropylene fiber

3.2.4.3. Influence des cendres volantes sur les caractéristiques de cisaillement

Sezer et al. (2006) ont montré que les caractéristiques de cisaillement du sol instable traité présentent une grande amélioration prouvant ainsi l'efficacité du traitement aux cendres volantes (Figure 3.19). Ainsi pour une teneur en cendres volantes de 20 % et une période de cure de 28 jours, la cohésion est environ 3.8 fois celle du sol non traité. De même, l'angle de frottement interne est environ 0.5 fois celui du sol non traité.

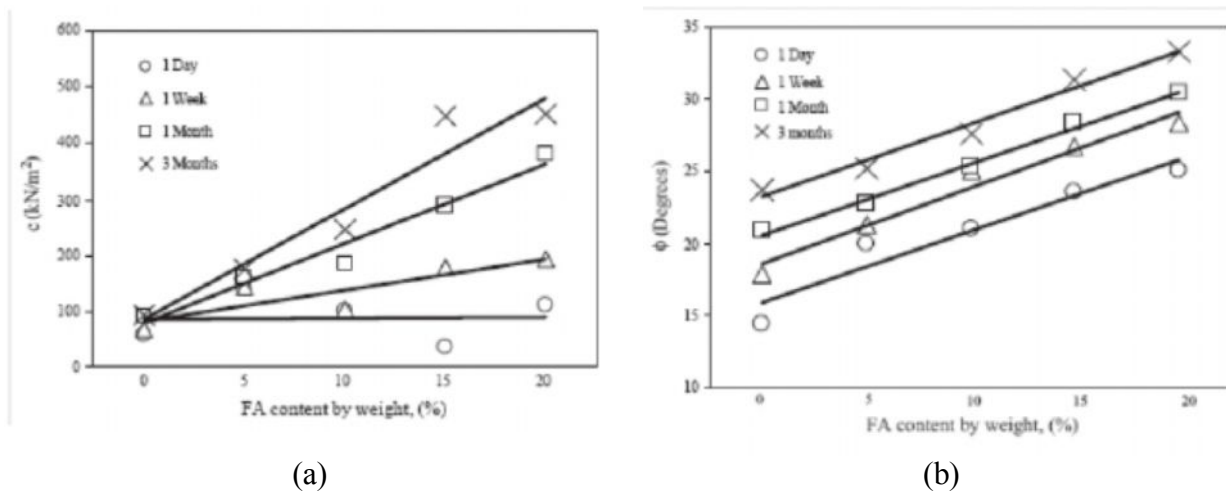


Figure III.19: Variation des caractéristiques de cisaillement (Sezer et al. 2006).
a. Variation de la cohésion, b. Variation de l'angle de frottement interne.

Vukićević. M. et al. (2013) ont montré que l'angle de frottement à long terme ne change pas sensiblement avec l'addition de cendres volantes pour les deux types de sols. D'un autre côté, la cohésion augmente de manière significative avec le temps pour tous les mélanges testés. Ceci est associé à des propriétés pouzzolaniques de cendres volantes utilisées (figure 3.20).

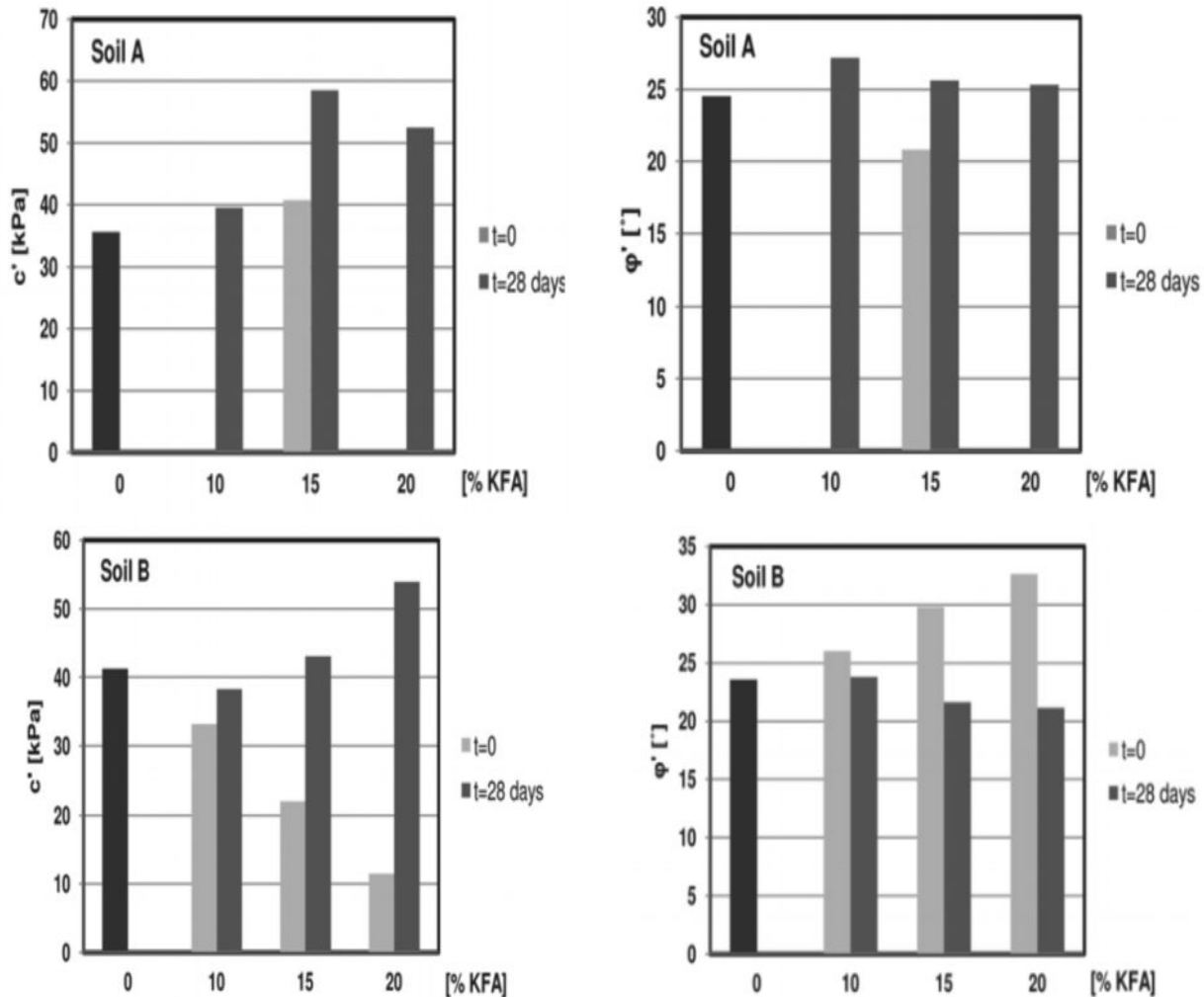


Figure III.20: Variation des paramètres de résistance au cisaillement (Vukićević et al. 2013).

III.3. Conclusion

La recherche bibliographique nous a permis à consulter la documentation concernant la thématique du traitement des sols au polypropylène, au ciment, à la chaux et aux cendres volantes. D'une manière générale ces études concernent des avancées techniques dans le mode de traitement et de stabilisation des sols. Dans le cadre de notre travail de recherche, il a été décidé de tester l'amélioration du comportement du sol de Chlef (sol à risque certifié par les différentes expertises), par des fibres en caoutchouc (poudrettes en caoutchouc). Les échantillons ainsi constitués sont testés à l'appareil de cisaillement direct. Les caractéristiques des matériaux sujets aux tests, l'appareillage utilisé et la procédure expérimentale sont exposées dans le chapitre suivant.